



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	マイクロ波シャドウグラフィ
Author(s)	青木, 由直; Aoki, Yoshinao
Citation	北海道大學工学部研究報告, 87, 135-145
Issue Date	1978-06-05
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41462">https://hdl.handle.net/2115/41462</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	87_135-146.pdf



# マイクロ波シャドウグラフィ

青木由直\*

(昭和 52 年 9 月 30 日受理)

## Microwave Shadowgraphy

Yoshinao Aoki

(Received September 30, 1977)

### Abstract

An imaging technique in radio wave region is discussed, where shadows of objects by a microwave, namely microwave shadowgrams, are recorded as microwave images. The so-called microwave shadowgraphy, is discussed theoretically referring to the analysis of the coherent imaging systems such as holography by the method of ray optics. An experiment by an object-scanned shadowgraphy is conducted with a 10 GHz microwave, where objects are scanned in a plane of 45 cm×50 cm size perpendicular to the axis connecting the fixed receiver and projector of microwave. An open end of an X-band waveguide is used as a receiver and an iris mounted on the end of the waveguide is used as a projector. Shadowgrams are displayed on the CRT scope by applying the amplified signals from the receiver to Z axis of the CRT and the position signals of the scanned object from the scanner to X and Y axes. The difference between the optical and radio wave images is discussed by comparing the shadowgram of an object made of metallic and dielectric materials with the photograph of the object. In the microwave shadowgram the metallic objects are visualized through the optically opaque dielectric materials. The relation between the shadowgram and hologram is discussed referring to the obtained experimental results. Further the advantages and disadvantages of this technique are discussed.

### 1. ま え が き

マイクロ波領域における映像技術は、レーダ技術を除けば、現在のところ未発達段階にあるといえる<sup>1)</sup>。特に室内程度の空間におけるマイクロ波映像技術は、マイクロ波の波長が長いことから、電波レンズ、電波ホログラフィ技術を利用する場合に困難を伴う。つまり室内で波長の数倍、あるいは波長程度の物体の映像化を考えた場合、映像系の解像力を向上させるために、必然的に電波レンズやホログラム開口を広げる必要がある。従って、開口の大きな電波レンズやホログラム開口を設定したり、電波像の結像や回折を行わせるため、広い空間を利用することになり、狭い空間での映像に適さなくなる。

しかしながら、狭い空間で、光やX線では見えない物体、例えば不透明誘電体中の金属物体とか、X線では透過して映像化できない誘電体中の欠陥を映像化したい要求があり、その原理が

\* 電子学科 電波応用講座

知られている映像技術でも、さらに再検討し、より実用的な電波映像方式、技術の開発を行う必要がある。本論文では最も簡単な映像法であると考えられる、マイクロ波による物体の影を映像化するシャドウグラフィ技術について、基礎的な検討を行っている。理論検討においては、光線により従来の波動的取扱いに比べて、より簡明にコヒーレント結像系を説明し、その結果を利用してシャドウグラフィ法の理論解析を行っている。実験検討においては、狭い空間での映像法に適していると考えられる、物体走査方式による装置を新しく考案し、波長の数倍、波長以下の大きさの金属物体、誘電体などの映像化の実験を行っている。また同じ装置でマイクロ波ホログラムを記録し、ホログラフィとの関連についても考察を行っている。

## 2. 原 理

### 2.1 各種シャドウグラフィ方式

超音波領域においては、物体の超音波による影を可視化したもの、つまり超音波シャドウグラムを記録する映像法が検討されている<sup>2)</sup>。ここではマイクロ波による物体の影を記録したもの、つまりマイクロ波シャドウグラムを得る方法をマイクロ波シャドウグラフィと呼び、このマイクロ波映像法について検討を加える。

シャドウグラフィ法は電波レンズのような結像素子を用いず、またホログラフィ法のように電波の回折場を記録し、それを光などで再回折させて像を読出す必要もないため、レンズ開口やホログラム開口の制限による像の分解能の低下ということはない。また回折効果の影響を無視できる場合には、送波器あるいは受波器開口を小さくしてゆけば、それだけ分解能が向上する。他方、シャドウグラフィは物体の単純な影を可視化しているため、3次元物体のような複雑な物体の映像化には適さぬという欠点がある。またコヒーレント性の良い電波を使用した映像法に必ず生じる回折効果が、像の分解能を低下させ、この影響を軽減させるため物体の配置等に制限がでてくるといった欠点もある。しかしシャドウグラフィはきわめて簡単な映像法であり、特別な用途には影の像でも充分役に立つと考えられ、もっと見直してよい電波映像技術であると考えられる。

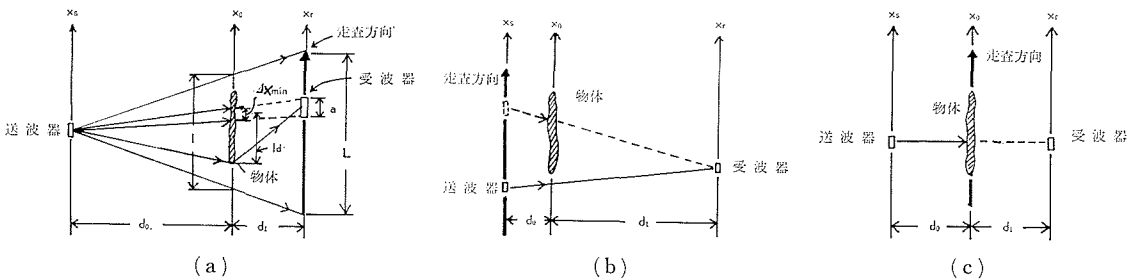


図-1 各種シャドウグラフィ方式; (a) 受波器走査方式, (b) 送波器走査方式, (c) 物体走査方式

物体の影を記録してゆく方法は大きく分ければ図-1に示す3通りの方法が考えられる。図-1(a)の方法は、受波器を走査して(または受波器のアレイにより)物体の影信号を受信し、これを可視化する方法であり、(b)の方法は受波器を固定し、送波器の走査により影を記録する方法である。ここでマイクロ波の送受波器の開口をともに無限小と仮定し、回折は考えず、幾何光学的な光線による単純な影のみを考えれば、図-1(a),(b)における影の倍率  $x_r/x_0$ ,  $x_s/x_0$  は次のように求まる。

$$\frac{x_r}{x_0} = 1 + \frac{d_1}{d_0} \tag{1}$$

$$\frac{x_s}{x_0} = 1 + \frac{d_0}{d_1} \tag{2}$$

いずれの場合も物体より影の方が大きくなる。さらに倍率が大きくなる配置につれて、回折効果の影響が顕著に現われてき、物体の幾何光学的な影が記録されにくくなる。

これに対し図-1(c)の方式では、影の倍率は物体面の位置に無関係で、送受波器を結ぶ光線を物体が遮ぎれば影が出来るから、物体の範囲だけ物体を走査することにより影像が記録できる。この方法では、物体全体にマイクロ波を照射する必要がなく、それだけ狭いスペースで映像装置が構成できるという利点がある。また送受波器を走査する場合より、物体を走査する場合の方が容易なこともあり、後述の実験ではこの方式が採用されている。

2.2 分解能と映像範囲

ここでシャドウグラフィ法における像の分解能と映像範囲の限界を、ホログラフィ等のコヒーレント結像法と比較検討してみる。ここでコヒーレント結像法とは、波動の可干渉性を利用した結像法、あるいは可干渉性も考慮した結像法の意味である。シャドウグラフィ法は原理的には波動の可干渉性を利用した映像法ではないが、後述のように受波器開口の指向性を考慮したり、物体による回折波を利用して影像を記録することを考えれば、シャドウグラフィの解析においてコヒーレント結像法の解析結果を利用することができるので、以下にコヒーレント結像法における分解能等につき光線による簡単な説明を試みる。

光線は2通りの様相で考えられる。一つは空間周波数に附随した光線で、この光線は物体の細さを表現する格子により回折される平面波を代表している。つまり平面の  $x$  座標についてのみ考え、この座標軸での物体を表す関数  $f(x)$  を次のようにフーリエ変換で表現した場合、

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j2\pi\xi x} dx \tag{3}$$

これは物体を  $\exp[-j2\pi\xi x]$  なる成分で形成される格子に分解したものと考えられる。ここで図-2に示すように  $z$  軸に対し  $\theta$  方向に進行する波長  $\lambda$  の単位振幅の平面波  $u$  は次のように表現できる。

$$u = \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin \theta + z \cos \theta) \right] \tag{4}$$

従って、前述の格子の空間周波数  $\xi$  と  $\theta$  方向へ進行する平面波、従ってこの方向へ進行する光線の傾き角  $\theta$  との間には次の関係が成立する。

$$\xi = \frac{\sin \theta}{\lambda} = \frac{1}{p} \tag{5}$$

ただし、 $p$  は図-2に示すように空間周波数  $\xi$  に対応する格子の周期を表す。ここで図-2に示すように有効開口  $a$  の受波器で、ホログラム開口  $L$  の範囲を走査して in-line ホログラムを記録し、これから像を再生する場合を考える。この場合記録される最高空間周波数成分  $\xi_{max}$  は次のように求まる。

$$\xi_{max} = \frac{\sin(\theta_{max})}{\lambda} \doteq \frac{L}{\lambda d_1} \tag{6}$$

式(6)は再生像の分解能を良くするためには、ホログラム開口を広げればよいというよく知られ

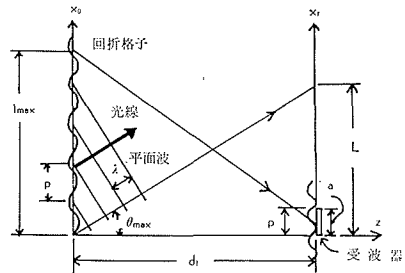


図-2 ホログラム開口と分解能および受波器開口  $a$  と映像範囲の関係

た結果を示している。

次に受波器が有限な開口を持つことによる影響を考える。受波器開口  $a$  より周期の短い干渉縞は、この開口の受波器では記録してゆくことができないとすれば、式(5)において  $p=a$  とした場合の角度を持つ光線が、記録される物体面の最大範囲  $l_{\max}$  を与え、次のようになる。

$$l_{\max} \doteq \frac{\lambda d_1}{a} \quad (7)$$

この結果は、受波器に入射する平面波を受波器開口面内で積分することにより得られる、干渉縞の変化分の平均値の係数  $\text{sinc}(\pi a/p)$  において、最初の零点を与える  $p=a$  なる値を基準にとった場合に得られる結果と同じものになる(付録I参照)。

一方、光線を光のエネルギーの流線とみなし、光線を遮ぎればそこに影ができるという、幾何光学的な光線を考えることができる。これは光の回折効果が無視できる範囲では妥当であるから、シャドウグラフィなどの説明に有効である。このような光線で考えた場合、図-1(a)のように点波源からの波で形成される影像の解像限界  $\Delta x_{\min}$  は受波器開口  $a$  で決まり、式(1)より次のように求まる。

$$\Delta x_{\min} = \frac{d_0}{d_0 + d_1} a \quad (8)$$

また影像が得られる物体面の範囲  $l$  は、受波器の走査範囲を用いて式(1)より次のように求まる。

$$l = \frac{d_0}{d_0 + d_1} L \quad (9)$$

式(8)、(9)の結果と式(6)、(7)の結果を比べてみると、ホログラフィにおいてはホログラムの開口が像の分解能を決め、受波器開口が映像化できる物体面の範囲を決めているのに対し、シャドウグラフィでは、前者の開口に相当する受波器の走査範囲が、映像化可能な物体面の範囲を決め、後者の受波器開口が像の分解能を決めている。

### 2.3 回折効果と受波器指向性の影響

シャドウグラフィに関するこれまでの議論では、回折効果とか、受波器の指向性等の波動の干渉性による影響を無視してきたが、実際にはこれらの影響を無視することはできない。例えば送波器からの直接波と物体からの回折波の光路差が  $\lambda/2$  以上になれば、物体の影に干渉縞が加わって記録され、シャドウグラムを劣下させる。また受波器の指向性は開口を小さくすれば無指向性に近づき、式(7)の結果からも明らかなように、より広範囲の物体面からの光路差の大きな光線を記録することになり、従って干渉縞がより顕著に記録される。そこで受波器の指向性を考慮して、物体からの回折効果が無視できる場合と、できない場合の基準について検討してみる。

式(7)は開口  $a$  の受波器の指向性パターンのメインローブの零点を与える近似式でもある。後述の実験では、受波器としては導波管の開端を用いているが、このような開口放射系の指向性を厳密に解いた結果を適当に近似すれば、式(7)の結果が得られる(付録II参照)。図-1(a)において、 $d_0 \gg d_1$  および  $d_0 \gg l_a$  を仮定すれば送波器から直接受波器に到達する光線と、物体点から回折されてゆく光線の光路差  $\Delta d$  が  $\lambda/2$  になる条件は次のように書ける。

$$\Delta d \doteq (d_1^2 + l_a^2)^{1/2} - d_1 = \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

式(10)を解くと次式が求まる。

$$l_a = \left( \lambda d_1 + \frac{\lambda^2}{4} \right)^{1/2} \quad (11)$$

従って、式(7)で示される受波器のメインローブの範囲を与える  $l_{\max}$  より、式(11)で与えられる  $l_u$  が大きければ、光路差が  $\lambda/2$  以上の光線を共に受波器で受けることがないと考えてよいため、干渉効果を見捨てることのできる。この  $l_{\max} < l_u$  の条件を求めると次式になる。

$$d_1 < \frac{a^2}{2\lambda} + \frac{a}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{\lambda^2} \right)^{1/2} \quad (12)$$

式(12)より、分解能をあげるため開口  $a$  を小さくすれば、物体面と受波器面の距離  $d_1$  を小さくせねばならぬことがわかる。例えば、 $\lambda \gg a$  とすれば  $d_1 < a/2$  となり、物体面から1波長よりもかなり近い距離の面で、受波器を走査しなければならぬことを示している。逆に  $\lambda \ll a$  の場合は、 $d_1 < a^2/\lambda$  となり、 $d_1$  に関する制限は大幅にゆるめられるが、開口が大きくなるため分解能は低下する。

つぎに本論文で実験検討がなされている、物体走査方式について考察する。今度は図-3において  $d_0 \ll d_1$  および  $d_1 \gg l_u$  を仮定すれば、式(11)に対応した  $l_u$  は  $d_1$  を  $d_0$  とおいたものとなり、この場合

$$l_u < l_{\max} \quad (13)$$

となる。式(13)は  $d_0 \ll d_1$  の配置の物体走査方式においては、受波器の指向性を鋭くして、物体からの回折波を受けぬようにすることは難しいことを示している。従って、今度は受波器の指向性は無視して、 $d_0$  の値によって回折波による干渉効果の影響をどの程度受けるかにつき検討してみる。

図-3に示すように物体の  $x_0$  座標成分  $dx$  と、 $z$  座標成分  $dz$  に分けて考える。実験では送波器としては、波長に比べてかなり小さなアイリスを用いているので、簡単のため送波器の開口を無限小と仮定し、その指向性は無指向性とする。物体の  $x$  成分  $dx$  が送波器からの一次波で照射され、物体成分が二次波源となって回折波を放射すると考え、回折波の強さは  $dx$  を照射する一次波の強さに比例すると仮定する。図-3に示すように、物体  $dx$  を照射する一次球面波は  $dx \cos \theta$  の範囲を通過する光線で表わされ、さらに強度は  $1/(d_0/\cos \theta)^2$  となる。従って、角度  $\theta=0$  に物体があり、受波器へ到達する信号と、 $\theta=\theta$  に物体があり、この物体から回折されて受波器で受かる回折波信号の強度比は、物体自身の指向性を見捨れば次式のように表わされる。

$$\frac{\frac{dx \cos \theta}{(d_0/\cos \theta)^2}}{\frac{dx}{d_0^2}} = \cos^3 \theta \quad (14)$$

同様に  $\theta$  方向にある  $dz$  成分からの回折波強度を  $dz/d_0^2$  で規格化した強度比は次のようになる。

$$\frac{\frac{dz \sin \theta}{(d_0/\cos \theta)^2}}{\frac{dz}{d_0^2}} = \sin \theta \cos^2 \theta \quad (15)$$

ここで直接波に対する回折波の光路差が  $\lambda/2$  なる角度において、式(14)の強度比が  $1/n$  になる条件を求めると、

$$\cos^3 \theta = \left[ \frac{d_0}{(d_0^2 + x_0^2)^{1/2}} \right]^3 = \left( \frac{d_0}{d_0 + \lambda/2} \right)^3 = \frac{1}{n} \quad (16)$$

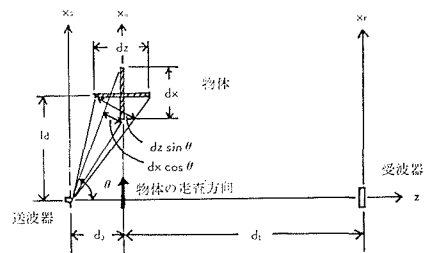


図-3 物体走査方式における回折効果

となるので、これを  $d_0$  について解くと次式が求まる。

$$d_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{n-1}} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (17)$$

式(17)を用いて  $n$  を変化させて描いた  $d_0$  のグラフを図-4に示す。図-4は、直接波に対して  $\lambda/2$  の光路差を有する回折波の強度を  $1/n$  に抑えるためには、 $d_0$  の値を描かれた曲線より小さくとらねばならぬことを示している。

つぎに図-3の  $z$  軸に平行に置れた物体成分  $dz$  による回折波について、式(15)をもとにして考えてみる。式(15)を書直すとつぎのようになる。

$$\sin \theta \cos^2 \theta = \frac{x_0 d_0^2}{(d_0^2 + x_0^2)^{3/2}} \quad (18)$$

$d_0$  をパラメータとして  $x_0$  を変化させ、式(18)の値をプロットしたグラフを図-5に示す。図-5は  $dz$  のように置かれた物体では、回折波の強度が極大になる場所があることを示している。また図-5において、直接波に対し、 $\lambda/2$  の光路差を有する回折波の強度を  $\Delta$  印で示しているが、このグラフの例では、 $\lambda/2$  の光路差を有する回折波の強度は無視できないことを示している。後述の実験でも、 $dz$  のように置かれた、波長より小さな金属物体からの回折波が干渉縞となって記録されている。回折効果により、干渉縞がシャドウグラムに顕著に現われるようになった場合、シャドウグラムの分解能を定める適当な基準はなく、干渉縞がはっきり記録されたものは、ホログラムとして像処理を行った方がよい。

### 3. 実験

#### 3.1 物体走査方式の実験構成

先に述べたように、物体全体にマイクロ波を照射しなくともよく、物体走査の方が容易で、比較的狭い空間でシャドウグラムを記録できるなどの理由から、物体走査方式による実験を行った。マイクロ波シャドウグラム記録装置は図-6に示したようなもので、固定した送受波器を対向させて配置し、その間に物体を挿入してこれを走査した。マイクロ波はクライストロン発振器からの 10 GHz 付近の AM 変調されたものを用いた。送波器は導波管開端にアイリスをマウントしたものを用い、受波器としてはフランジの付いた導波管開端そのものを用いた。

走査装置は2個の同期モータにより、45 cm × 50 cm の平面をラスタ状に走査できる機構になっている。走査装置に取付けられた2個のポテンショメータから、物体の位置座標の信号を得て、これを CRT の X 軸、Y 軸に加え、物体の走査と CRT の輝点の走査を同期させている。

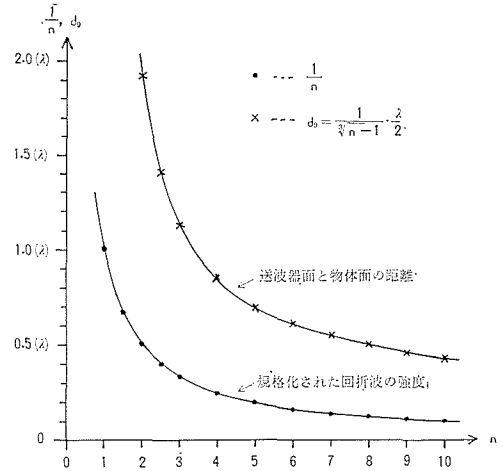


図-4 規格化された回折波の強度  $1/n$  と送波器面と物体面の距離  $d_0$

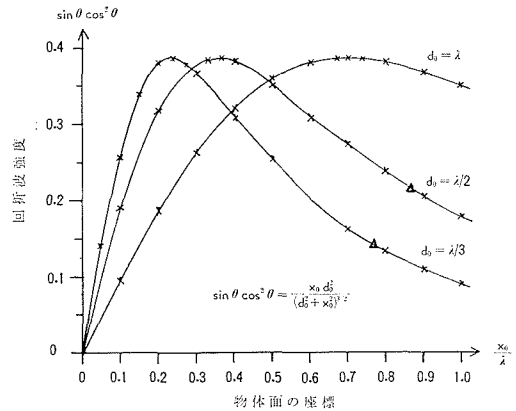


図-5 規格化された回折波の強度

受波器からの信号は検波、増幅されて CRT の  $x$  軸に加えられ、輝度変調が行われる。このようにして CRT スコープ面上の輝点の軌跡を、開放にしたカメラで記録して、マイクロ波シャドウグラムを得ている。

### 3.2 波長程度の物体のシャドウグラム

ここで実験を行っているシャドウグラフィ方式は、狭い空間で、かなり小さな物体、例えば波長程度の物体の映像化にも適用できるというのが利点の一つと考えられるため、どの程度の大きさの物体の映像化が可能か実験的に検討してみた。先に考察したようにシャドウグラフィ法では、受波器あるいは送波器の開口を小さくすることが、分解能向上の一つの条件となるため、送波用導波管開端にアイリスをマウントして送波器開口を小さくし、その直前で物体を走査させてシャドウグラムを記録した。

アイリスとして、銅板で作った  $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  の矩形のものを選び、物体として 図-7 に示したアルミ板で作った大きさが  $6\text{ cm} (2\lambda) \times 6\text{ cm}$ 、文字の太さ  $1\text{ cm}$  の物体を選び、図-6 における距離を  $d_0 = 1.0\text{ cm}$ 、 $d_1 = 9\text{ cm}$  として記録したマイクロ波シャドウグラムを 図-8 (a) に示す。このシャドウグラムではほぼ元の物体に似た影象が得られているが、文字の細部まで解像されているとはいえない。同様に、アルミ板で作った大きさ  $8.5\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、文字の太さ  $1\text{ cm}$  の少し大きな文字 M を物体にした場合のシャドウグラムを 図-8 (b) に示す。この程度の大きさの物体になれば、はっきりと元の物体の形状を知ることができる。

図-8 (a), (b) において、物体の黒い影象の横に、矢印で示された白い円形の像が見える。これは 図-7 で矢印で示されたネジの像で、このネジは物体を支持するためのアクリル棒にとめられている。ネジの長さは約  $2\text{ cm}$  で 図-7 の写真からも明らかなように、このネジは波長に比べてかなり小さい。ネジの像の形成のされ方は回折によるもので、図-3 において、ネジが物体成分  $dz$  のように置かれた場合に相当する。従って、図-5 のグラフからも明らかなように  $\theta = 0$  の場所では、ネジによる回折波はほとんどないが、ネジがアイリスからほぼ  $\lambda/2$  ずれていったところで回折される回折波の強度は無視できなくなり、このネジによる回折波と、アイリスから直接受波器に到達する直接波が干渉を起し、物体の影とはコントラストが逆になった像が形成される。

物体を支持しているアクリル棒についても同様のことがいえ、この棒の縁部分のみが黒い像となっているのも、回折によるものである。このように平面物体でない場合、回折効果によりコントラストが逆転した像が記録される場合などがあり、シャドウグラフィで 3 次元物体の投影像の映像化を行う場合などは、回折効果の点などからも困難なことが予想される。しかし見方を変

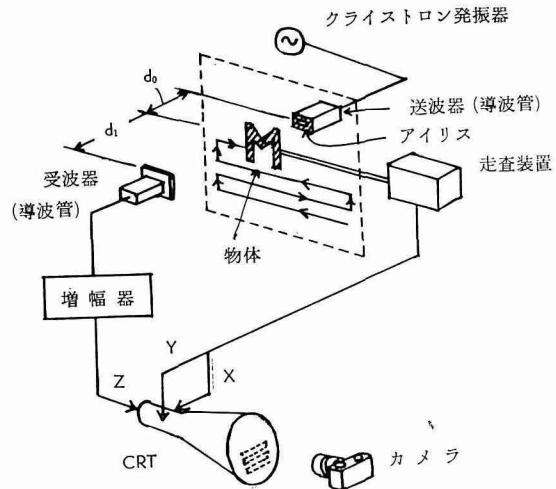


図-6 マイクロ波シャドウグラム記録装置

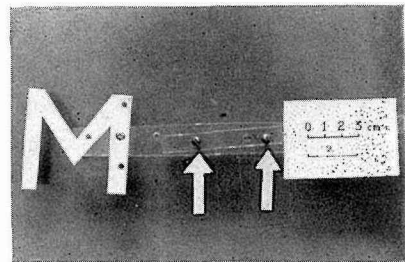


図-7 アルミ板で作った大きさが  $6\text{ cm} (2\lambda) \times 6\text{ cm}$ 、文字の太さ  $1\text{ cm}$  の物体

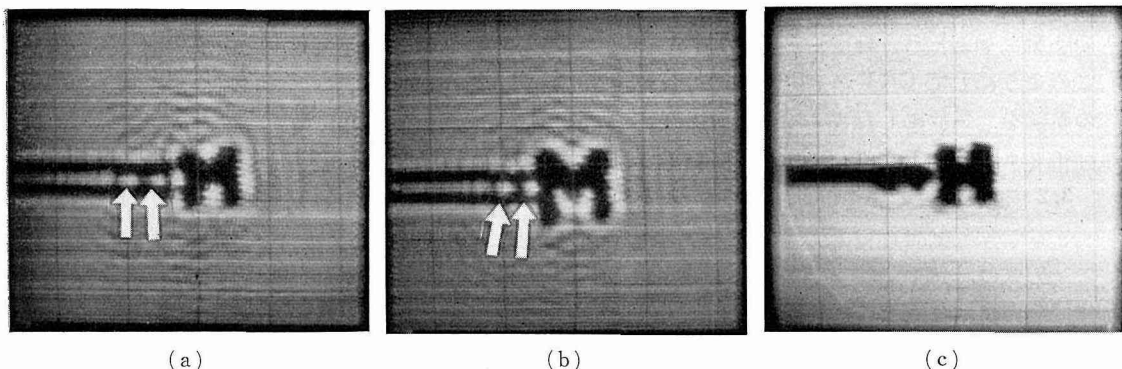


図-8 マイクロ波シャドウグラム; (a) 図-7の物体のシャドウグラム, (b) 大きさ  $8.5\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ , 文字の太さ  $1\text{ cm}$  の物体のシャドウグラム, (c) 図-7の物体のシャドウグラム

えれば、図-8(a), (b)の結果は、波長よりも小さな物体でも、回折像をつかまえることにより映像化して検知できることを示している。回折効果を軽減するためには、先の議論から、直接波に対して  $\lambda/2$  の光路差を持つ回折波が受波器開口に対してより斜め方向から入射してくるようになればよいから、送受波器の間隔を短かくしてシャドウグラムを記録した。物体は図-7のものを用い、アイリスとしては  $2.5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  のものを選び、 $d_0=1.0\text{ cm}$ ,  $d_1=2.2\text{ cm}$  として記録したシャドウグラムを図-8(c)に示す。このシャドウグラムでは、もはや図-8(a), (b)に見られるコントラストの反転したネジの像は見られなくなっており、アクリル棒も物体と同じコントラストで映像化されている。干渉効果が軽減されたのと、より小さなアイリスを用いたため、図-8(a), (b)に比べて図-8(c)の方が文字の縁などがはっきり映像化されているのがわかる。

### 3.3 誘電体と金属物体のシャドウグラム

同じ電磁波でも電波と光波ではそのスペクトルが非常に異なるため、光学像とは異った電波像が得られ、この特色を積極的に利用すれば、この電波映像技術の応用にあたって利点となし得るものである。ここでは上記の点を考慮して、誘電体と金属物体を組合せた物体のシャドウグラムを記録して、簡単な実験検討を行った。

誘電対と金属では電波を透過反射させる割

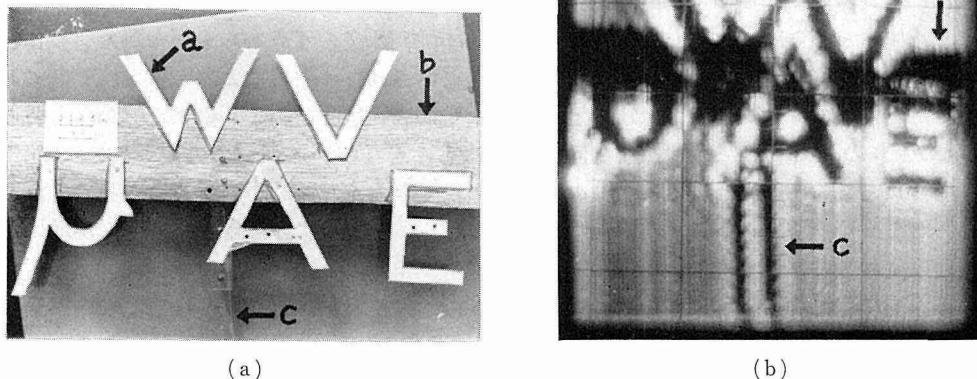


図-9 金属物体(アルミ板 a)および誘電体(ベニヤ板 b およびアクリル棒 c)の光学像(a)とそのマイクロ波シャドウグラム

合いが異なり、これがシャドウグラムとして映像化される場合どのような様子になるかを見るため、図-9(a)に示すように薄いベニヤ板(矢印 b)にアルミ板(矢印 a)で作った文字を配列し、これをアクリル棒(矢印 c)でささえた物体を作った。送波器用のアイリスとしては、銅板の3.5 cm × 7 mm のものを用い、図-6における距離を  $d_0=1.0$  cm,  $d_1=4$  cm として記録したこの物体のシャドウグラムを図-9(b)に示す。つまり図-9(a)が光学像で、図-9(b)が電波像ということになる。光学像の場合、図-9(a)の物体を裏側から見れば文字の一部はベニヤ板にかくされて見えなくなってしまう。これに対して図-9(b)の電波像では、マイクロ波がベニヤ板を透過して、金属物体の影が記録されているのがわかる。ベニヤ板の境界も見分けがつかず、しかし金属物体の影に比べてベニヤ板の部分の影がうすいといった灰色レベルの表示にはなっていない。一般にシャドウグラフィ法では、線形な灰色レベルの表示ということは困難である。金属物体の周囲の白い縁どりや、アクリル棒の中央が白くなっているのは回折効果によるものである。図-9の像は、図-8の1個の文字を使用したものに比べて像の質が低下しているが、これは物体が大きくなったため、物体走査に際して物体がかなり揺れるなどの理由による。

### 3.4 ホログラフィとの関連

前述のように、受波器面あるいは送波器面と物体面が離れるにつれて、シャドウグラムには干渉縞が記録されてくるようになる。この点につきさらに検討を加えるため、物体面と受波器面の距離を変えてシャドウグラムを記録してみた。送波器として開口が11 cm × 15 cm の角錐電磁ホーンを用い、受波器としては前述までの実験と同様に導波管の開端を用い、物体としてはアルミ板で作った高さ9.4 cm、幅11 cm、文字の太さ1.3 cmの文字Aを用いた。図-6において  $d_0=40$  cm,  $d_1=1$  cm とした場合のシャドウグラムを図-10(a)に示す。次に  $d_0=42$  cm,  $d_1=8$  cm とした場合に記録されたパターンを図-10(b)に示す。図-10(b)には文字Aの回折パターンが記録されており、これはいわば in-line ホログラムであり、シャドウグラムとホログラムは干渉縞の記録される度合によって区別されるものであることを示している。

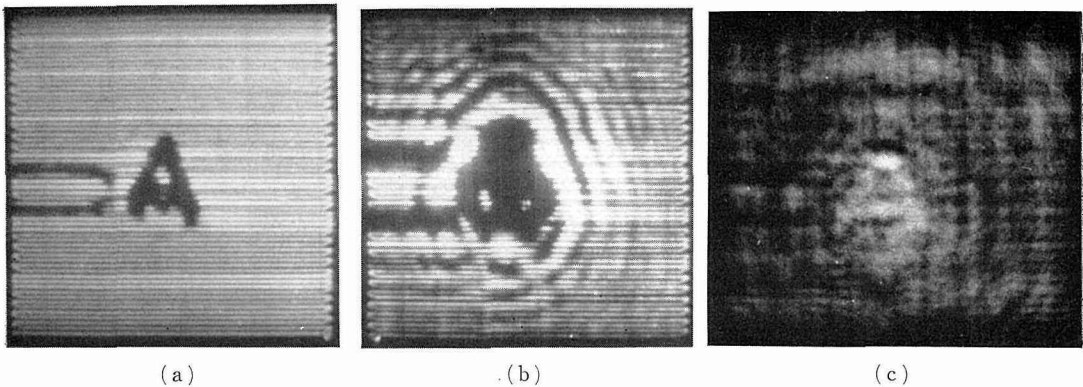


図-10 マイクロ波シャドウグラム(a)およびホログラム(b)とホログラムからの光学的再生像(c)

通常のマイクロ波ホログラムの光学的像再生<sup>3)</sup>と同様にして、図-10(b)のホログラムを写真縮小し、そのネガフィルムにレーザー光を照射して再生した像を図-10(c)に示す。図-10(c)には鮮明ではないが物体の文字Aが再生されているのが観察される。

ホログラフィは2段階にわたる映像法で、像を得るまでの過程が複雑で、その過程に再生像の質を低下させる種々の要因が介在する点が欠点となる。特に電波ホログラフィなどの場合は、

ホログラム作成時と像再生時では異なる波長の波動を使用しているため、ホログラムの縮小が必要となり、この縮小過程でパターンや強度の非線形な転写がなされる可能性がある。さらにホログラム記録の際の分解能、ダイナミックレンジなどはシャドウグラム記録よりは厳しい条件が要求され、限られた性能の電場記録装置を使用した場合、シャドウグラムに比べて良質の再生像がホログラムから得られるとは限らない。図-10の例では、明らかにシャドウグラムの方がホログラムからの再生像より良質な像となっている。しかし立体のような物体で、物体の直後に受波器を配置することが困難で、どうしても干渉効果が現われてくるような場合は、ホログラフィックな手法で再回折により像の再生が必要となってくる。

ここで一つ注目すべきことは、ホログラフィックな手法を用いた場合も、物体走査方式は狭い空間でも再生像が得られていることである。これは従来検討されている電波ホログラフィにおいては<sup>3)</sup>、物体全体にマイクロ波ビームを照射し、かなり広い2次元平面を受波器で走査してホログラムを記録しているのに比べ、制限された空間内でホログラフィ映像法を応用する場合は本方式が有利であることを示している。

#### 4. む す び

マイクロ波領域において、波長、あるいはその数倍程度の大きさの物体を対象とした電波映像技術がほとんど開発されていない現状において、マイクロ波シャドウグラフィはこのような技術開発の一つの方向を示唆している。シャドウグラフィの原理はよく知られており、特に新しい映像法ではない。しかしマイクロ波領域において、このような映像法に関する具体的な検討例<sup>4)</sup>はほとんどみあたらず、特に本論文において実験検討がなされている物体走査方式は、新しい有効なシャドウグラフィ方式であると考えられる。このような方式の映像法は、狭い空間で小さな物体を対象とした電波映像法として有効なものであり、実際に実験結果からも、波長の数倍の簡単な物体であれば十分に映像化できることが示されている。波長をさらに短かくして、ミリ波帯の電波を使用すれば、ミリメートル程度の解像度が期待され、この電波映像法の応用範囲も広がるものと考えられる。

一方本論文でのシャドウグラム記録装置のように、機械的走査機構が介在する場合、シャドウグラム記録に時間がかかるという欠点がある。この点に関しては走査方法を改良し高速な機械走査にするとか、受波器アレイを用いるなどの方法が考えられる。また電波像の表示方法として検討されている、光導伝性半導体板を光ビームで走査する方法<sup>5)</sup>をシャドウグラフィ装置に応用することも考えられ、今後の課題である。また本論文では触れなかったが、このようなシャドウグラフィ技術の応用の一つとして、最近盛んに用いられるようになってきたマイクロ波電力応用機器などからの漏れ放射界を映像化し検知することなどが考えられ、今後の研究課題である。

#### 文 献

- 1) 青木由直: テレビ誌, 30 (昭51), 4, p. 326.
- 2) Alais, P.: Acoustical Holography Vol. 5 (1974), p. 671, Plenum Press.
- 3) 青木由直: 信学論 (B), 51-B (昭43), 7, p. 339.
- 4) Aoki, Y.: Proc. IEEE (Lett.), 65 (1977), 6, p. 982.
- 5) Jacobs, H., Hofer, R., Morris, G. and Horn, E.: J.O.S.A., 58 (1968), 2, p. 246.
- 6) シェルクノフ (森脇訳): 電磁波論 (昭37), p. 381, 岩波書店.

## 付 録 I

図-2において、 $x_r$ 軸に平行な波面の単位振幅の平面波と重じょうされて、周期 $p$ の干渉縞を形成する傾いた単位振幅の平面波は、 $x_r$ 軸上で式(4)、(5)の關係を用いて次のように表わされる。

$$u_r = \exp[-j2\pi x_r/p] \quad (\text{A-1})$$

つまり干渉縞は次のように表される。

$$|1+u_x|^2 = 2[1+\cos(2\pi x_r/p)] \quad (\text{A-2})$$

開口 $a$ の受波器でこの干渉縞を記録してゆくものとし、受波器開口面内での干渉縞の変化分の平均値について求めると次のようになる。

$$\frac{1}{a} \int_{x_r}^{x_r+a} \cos(2\pi x_r/p) dx_r = \text{sinc}\left(\frac{\pi a}{p}\right) \cos \frac{2\pi}{p} \left(x_r + \frac{a}{2}\right) \quad (\text{A-3})$$

従って、干渉縞の変化分の平均値が零となる最初の零点を与える $p$ の値を求めると、 $p=a$ となる。

## 付 録 II

長辺が $b$ 、短辺が $a$ の矩形導波管の開端からの放射強度 $\Phi$ は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$\Phi = \frac{b^2 E_0^2}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \sin \phi\right) \cos^2\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \cos \phi\right)}{\sin^2 \theta \sin^2 \phi [\pi^2 - (2\pi/\lambda)^2 b^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi]^2} \times \\ \times \left[ \left\{ (1 - (f_c/f)^2)^{1/2} + \cos \theta \right\}^2 + (f_c/f)^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi \right] \quad (\text{A-4})$$

ただし $E_0$ は電界の振幅、 $f_c$ は導波管の遮断周波数、 $\theta$ 、 $\phi$ は極座標での開口面に垂直な軸、および長辺に平行な軸からの角度である。ここで短辺方向の指向性について考えると、 $\phi = \pi/2$ として、開口面から観測面までの距離を $d_1$ 、観測面上の軸上 $l$ の位置で考え、 $\theta$ を小さいと仮定し、 $\sin \theta \doteq \theta \doteq l/d_1$ と近似できる場合、 $\theta = 0$ での放射強度で規格化した $\theta = l/d_1$ 方向の放射強度は次のように求まる。

$$\frac{\Phi\left(\phi = \frac{\pi}{2}\right)\Big|_{\theta = l/d_1}}{\Phi\left(\phi = \frac{\pi}{2}\right)\Big|_{\theta = 0}} \doteq \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a l}{\lambda d_1}\right)}{\left(\frac{\pi a l}{\lambda d_1}\right)^2} \quad (\text{A-5})$$

ゆえに式(A-5)より、放射パターンのメインローブの零点を与える $l$ の値 $l_{\max}$ は $(\pi a l_{\max}/\lambda d_1) = \pi$ とおいて式(7)が求まる。